УДК 621.372

МОНОЛИТНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ СХЕМА ДВУХПОЗИЦИОННОГО СВЧ КОММУТАТОРА НА GaAs

Т.С. Петрова, Е.Л. Ерёмина, М.Г. Игнатьев*, Л.А. Козлова*, А.А. Баров**

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
*ОАО НИИПП, г. Томск
**ООО «НПФ «Микран», г. Томск
E-mail: tanya@micran.ru

Разработана и изготовлена монолитная интегральная схема двухпозиционного СВЧ коммутатора на основе ионно-легированной структуры GaAs с полевыми транзисторами с субмикронным затвором Шоттки, полученной при использовании оптической фотолитографии.

Введение

Развитие электроники СВЧ идет по пути миниатюризации электронных приборов. Электровакуумные приборы и волноводные линии передачи во многих устройствах сменили полупроводниковые приборы и микрополосковые линии передачи на диэлектрической подложке. На их основе были созданы гибридные интегральные схемы. Дальнейшие этапы миниатюризации связаны с переходом от гибридных интегральных схем к монолитным приборам. Последние выполняются на полупроводниковой подложке, как правило, из арсенида галлия, а составляющие приборы активные и пассивные элементы изготавливаются в едином технологическом цикле. С созданием монолитных приборов появилось новое самостоятельное направление электроники – СВЧ микроэлектроника [1–4].

Традиционно микроэлектроника считалась областью цифровой техники. Отличительной особенностью этих микроэлектронных приборов является то, что все активные и пассивные элементы в них изготавливаются в объеме полупроводника в виде составляющих транзисторных и диодных структур. Технологические процессы изготовления цифровых интегральных схем на основе кремния хорошо отработаны, а потому схемы имеют малую стоимость (на одну транзисторную структуру) и большую надежность из-за отсутствия паяных и сваренных контактов [5].

Существенным ограничением микроэлектронных приборов на основе кремния являются сравнительно низкие рабочие частоты. Это ограничение может быть устранено при переходе к подложке (кристаллу) из арсенида галлия. Арсенид галлия обладает значительно большей, чем кремний, подвижностью электронов, а значит большей электропроводностью и меньшими значениями сопротивлений, что позволяет увеличить скорость переключения приборов из одного состояния в другое и снизить величину прямых потерь в устройствах управления амплитудой на СВЧ (переключателях, аттенюаторах). В этой связи задача создания монолитного двухпозиционного коммутатора в СВЧ-диапазоне (8...12 ГГц), решаемая в данной работе, является актуальной и практически важной [6–9].

Двухпозиционные СВЧ коммутаторы имеют широкое применение в измерительном оборудовании, вооружении, гражданских и военных радарах, беспроводной связи, терминалах спутниковой связи, антенных фазированных решетках. Разработка идентичных схем ведется на нескольких предприятиях в России. Аналогом подобных схем служит двухпозиционный СВЧ коммутатор зарубежных фирм M/A-COM, TriQuint и т. д.

Целью данной работы является разработка и изготовление монолитной интегральной схемы двухпозиционного коммутатора на основе ионно-легированной структуры GaAs с полевыми транзисторами с субмикронным затвором Шоттки, полученными при использовании оптический фотолитографии.

Разрабатываемый СВЧ коммутатор 1×2, 2×1 должен иметь следующие параметры:

- Диапазон рабочих частот 8...12 ГГц.
- Вносимые потери в полосе рабочих частот – не более 3,5 дБ.
- Развязка плеч не менее 50 дБ.

Дополнительные конструктивные и технологические параметры монолитной интегральной коммутационной схемы на основе GaAs полевых транзисторов:

- Субмикронный затвор, полученный по самосовмещенной технологии; длина затвора 0,3 мкм.
- Напряжение отсечки полевого транзистора с затвором Шоттки 1...2 В.
- Напряжение пробоя затвор – сток не менее 7 В.
- Удельное сопротивление сток-исток полевого транзистора с затвором Шоттки не более 2,4 Ом/мм.
- Удельная емкость затвор-исток полевого транзистора с затвором Шоттки в закрытом состоянии не более 0,6 пФ/мм.
- Удельная емкость планарного конденсатора 0,00075 Ф/м^2.
- Поверхностное сопротивление пленочного резистора 20 Ом/□; объемного – 200 Ом/□.

Схема СВЧ коммутатора, рис. 1, построена на нормально открытых полевых транзисторах с затвором Шоттки, которые требуют для перекрытия канала управляющее напряжение отрицательной полярности. В режиме коммутируемого сопротивления канала коммутатор является двухполюсным элементом, поэтому для него также справедливо введение понятия качества [10] с целью определения предельных значений вносимого затухания и развязки. При проектировании монолитной интегральной схемы на полевых транзисторах с затвором Шоттки определяющими параметрами коммутационного элемента являются удельные паразитные сопротивления и емкости на единицу ширины затвора транзистора. Паразитные сопротивления и емкости зависят от исходного полупроводникового материала, из которого изготавливается транзистор, а также от его топологии и технологии производства [11].

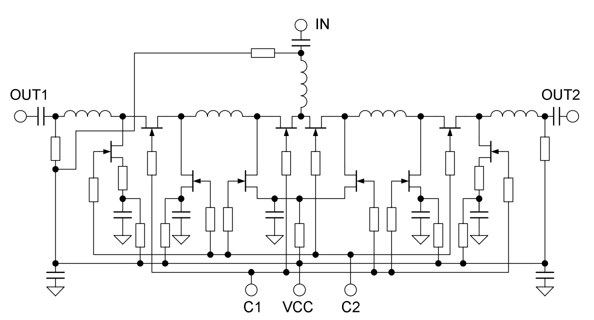


Рис. 1. *Электрическая схема двухпозиционного СВЧ коммутатора*

Одним из основных требований к транзисторам в схеме коммутатора – это низкий уровень шума. Для достижения этого, необходимо уменьшать паразитное сопротивление в цепи исток – затвор, определить оптимальную длину затвора, и толщину металлизации самого затвора.

Топология разработанной монолитной интегральной схемы коммутатора представлена на рис. 2.

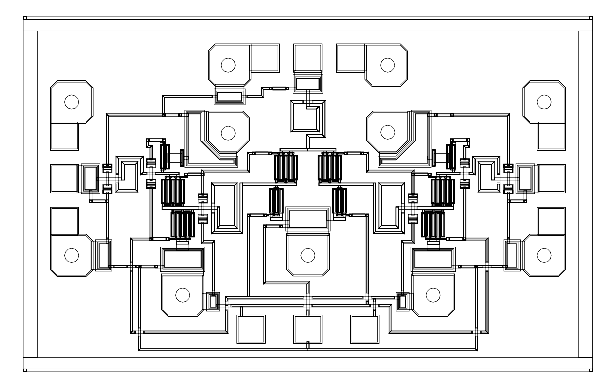


Рис. 2. *Топология двухпозиционного коммутатора*

Методика изготовления интегральной схемы

Уменьшение паразитного сопротивления транзистора, является основным требованием для получения рабочей схемы. Для выполнения этого требования необходимо уменьшить топологические размеры области сток – исток; затвор должен располагаться ближе к контакту истока. Толщина затворной металлизации подбиралась с учетом технологических и схемотехнических параметров. Для затворной металлизации использовали слои Ta и Au толщиной 0,1 и 0,2 мкм соответственно. Толщину слоя золота можно увеличить до 0,35 мкм, что позволит уменьшить паразитное сопротивление затворной металлизации.

При изготовлении монолитной интегральной схемы использовалась ионнолегированная полупроводниковая структура GaAs. Толщина контактного n^+ слоя – 0,075 мкм, концентрация электронов – $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Толщина активного слоя – 0,2 мкм, концентрация электронов – $4 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$.

Технология изготовления базировалась на создании транзисторов с субмикронными размерами длины затвора 0,25...0,35 мкм [2]. Расстояние между металлизацией стока и истока – 3,5...4 мкм. Омические контакты получали при вжигании слоев AuGeNi-Au (0,15...0,1 мкм), осажденных методом термического испарения в вакууме, к n^+ слою. Межэлементная изоляция выполняется при имплантации ионов водорода в полупроводник.

Первым этапом создания монолитной интегральной схемы является изготовление полевого транзистора с затвором Шоттки. Технологический процесс можно представить следующим образом. После формирования омических контактов и выделения активных областей схемы на всю поверхность структуры наносится диэлектрический слой SiO_2 толщиной 0,5 мкм, а затем слой метала (Al). В слое алюминия формируется маска затвора, которая и определяет длину затвора. Изменяя толщину слоя алюминия, можно изменять длину затвора от 0,25 до 0,35 мкм.

По поверхности слоя алюминия методом фотолитографии создают рисунок затвора. По маске фоторезиста проводится травление слоя Al незащищенной области (рис. 3, А). По той же маске фоторезиста проводится нанесение еще одного слоя Al, а затем фоторезист удаляют. В результате создается маска рисунка затвора из металлических слоев (Al-Al), которая впоследствии определяет длину затвора (рис. 3, Б). С помощью фотолитографии (рис. 3, В) формируется рисунок для травления диэлектрика SiO_2 через маску Al-Al. Ширина канавки в диэлектрическом слое определяет пробивное напряжение транзистора: чем больше растрав слоя SiO_2, тем больше значение напряжения пробоя. Затем проводится химическое травление контактного и части активного слоев арсенида галлия (рис. 3, Г), наносится слой металла затвора (TaAu) и удаляются фоторезистивная и металлическая (Al-Al) маски [13]. Сформированная структура представлена на рис. 3, Д.

Заключительным этапом формирования полевого транзистора с затвором Шоттки является формирование второго уровня металлизации, соединяющего единичные секции истока.

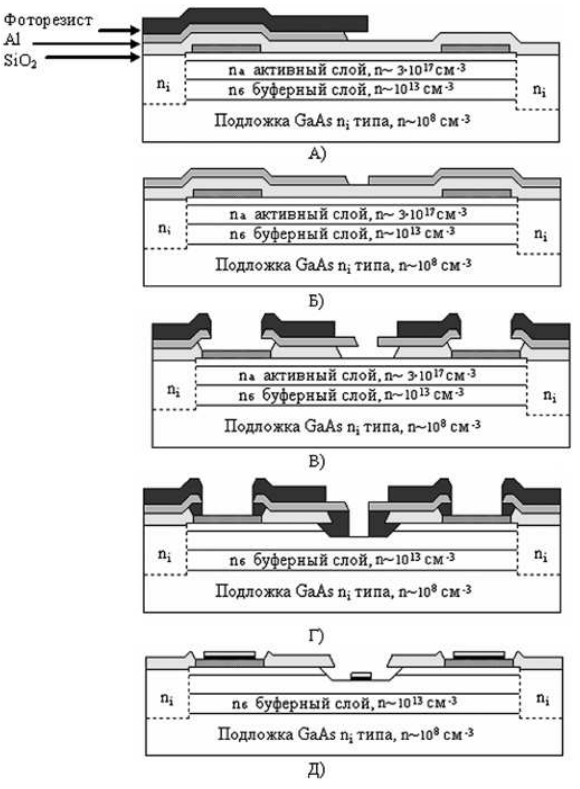


Рис. 3. *Технологический процесс изготовления полевого транзистора с затвором Шоттки с субмикронными размерами: А) создание рисунка затвора; Б) маска рисунка затвора из металлических слоев (Al-Al); В) травление первого маскирующего слоя (SiO_2); Г) травление GaAs; Д) сформированная структура затвора полевого транзистора*

Пассивными элементами в данной схеме являются пленочные конденсаторы, а также пленочные и объемные резисторы. Все эти элементы изготавливают после формирования полевого транзистора с затвором Шоттки.

Пленочные резисторы проектировались из расчета 20 Ом/□. В качестве резистивных слоев были использованы пленки тантала и композиция силицида вольфрама (WSi). По термической стабильности наиболее устойчивыми оказались резисторы из силицида вольфрама: у них отмечается минимальное, не более 10 %, изменение номинала при воздействии высокой температуры (до 490 °С). Объемные резисторы формируются при локальном травлении слоя GaAs через маску фоторезиста для получения необходимого номинала.

При изготовлении конденсатора можно использовать два типа диэлектрика – SiO_2 и Ta_2O_5. Эти диэлектрики очень заметно отличаются по диэлектрической проницаемости и плотности слоя. Недостатком оксида кремния является высокая пористость пленки, низкая диэлектрическая проницаемость и появление дефектов пленки при резком изменении внешних факторов. Таким образом, при использовании SiO_2 увеличиваются топологические размеры самого конденсатора. Использование Ta_2O_5 толщиной 0,3 мкм позволило в несколько раз уменьшить размеры конденсатора, избежать появления дефектов, резко повысить процент выхода годных приборов.

Достоинством данной интегральной схемы является получение субмикронного размера затвора при использовании фотолитографии через маску Al-Al. Подобные размеры длины затвора можно получить только при использовании электронной литографии.

Завершающим этапом формирования интегральной схемы является формирование сквозных лазерных металлизированных отверстий, которые являются соединительным элементом контактных площадок истока, нижних конденсаторных обкладок и заземляющей плоскости. При этом не используется проволочное соединение и торцевая

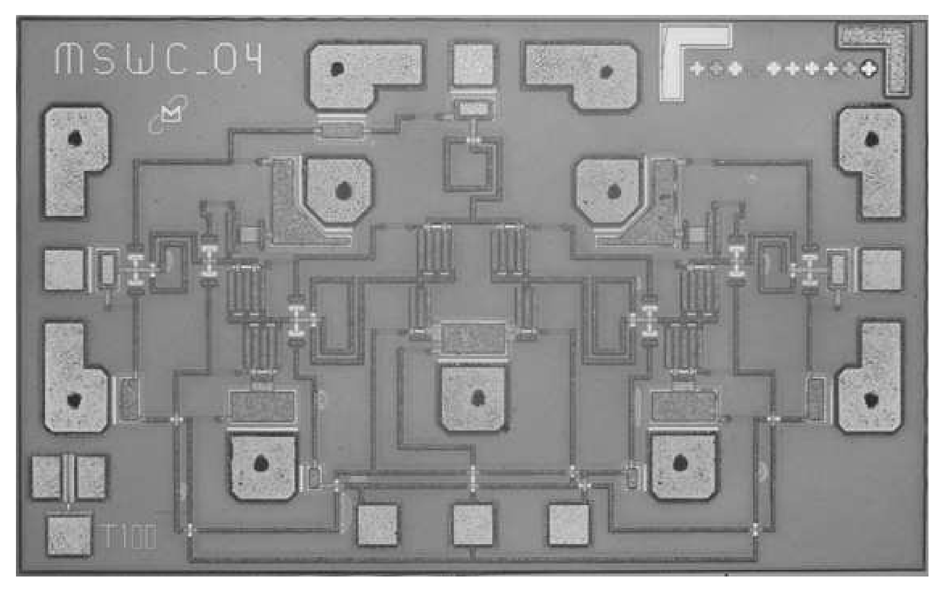


Рис. 4. *Двухпозиционный СВЧ коммутатор на полевых транзисторах с затвором Шоттки*

металлизация кристалла монолитной интегральной схемы. Благодаря применению лазерных технологий существенно уменьшаются размеры кристалла, увеличивается плотность упаковки элементов интегральной схемы и уменьшается паразитная индуктивность истокового вывода [14].

Таблица. *Сравнительные частотные характеристики интегральной схемы*

Параметры	Значение параметров	
	Фирма M/A-COM	Фирма "МИКРАН"
Диапазон рабочих частот, ГГц	2...20	2...18
Вносимые потери на частоте 10 ГГц, дБ	3	<3,5
Развязка плеч в полосе рабочих частот, дБ	50	>50

Характеристики интегральной схемы двухпозиционного СВЧ коммутатора, рис. 4, в сравнении с мировым аналогом (фирма M/A-COM) представлены в таблице.

Заключение

Разработана монолитная интегральная схема двухпозиционного СВЧ коммутатора на основе ионно-легированной структуры GaAs с полевыми транзисторами с субмикронным (0,3 мкм) затвором Шоттки, создана технология ее изготовления. Показано, что в полосе частот 2...18 ГГц развязка между каналами коммутатора превосходит 50 дБ, а прямые потери на частоте 10 ГГц не превышают 3,5 дБ. Все статические параметры и СВЧ характеристики устройства полностью соответствуют техническим требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бова Н.Т., Ефремов Ю.Г. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. – Киев: Техника, 1984. – 184 с.
2. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
3. Гассанов Л.Г., Липатов А.А. и др. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
4. Лебедев И.В., Алыбин В.Г., Купцов Е.И. Интегрализация твердотельных управляющих и защитных устройств СВЧ // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1982. – Т. 25. – № 10. – С. 32–41.
5. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. – М.: Радио и связь, 1988. – 400 с.
6. Mehran R., Bokatuy M.M a. o. Higli Integrated X-Band MMIC SPDT Switch in CPW Technique // 11th Conference and Exhibition on Microwave. – Germany, Stuttgart, May 2001. – P. 223–225.
7. Muldavin J.B., Rebeiz G.M. High-Isolation CPW MEMS Shunt Switches. – Part 2: Design // IEEE Trans. – 2000. – V. 48. – № 6. – P. 403–407.
8. Kobayashi K.W., Tran L., Oki A.K., Streit D.C. A 50MHz–30GHz Broadband Co-Planar Waveqnide SPDT PIN Diode Switch with 45-dB Isolation // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. – 1995. – V. 5. – № 2. – P. 56–58.
9. Лоренц Д.В., Канделуола Д.Д. Полевые транзисторы на арсениде галлия. – М.: Радио и связь, 1988. – 489 с.
10. Gutmann R.J., Fryklund D.J. Characterization of Linear and Nonlinear Properties of GaAs MESFET's for Broad-Band Control Applications // Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1987. – V. 35. – № 5. – P. 516–521.
11. Jain N., Gutmann R.J. Modeling and Design of GaAs MESFET Control Devices for Broad-Band Applications // Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – V. 38. – № 2. – P. 109–117.
12. Петрова Т.С., Игнатьев М.Г. Технология изготовления малошумящего полевого транзистора для СВЧ приборов // Институт физики прочности и материаловедения СО РАН: Всеросс. Междунар. научная конф. – Томск, 2003. – С. 85–87.
13. Гроо Е.П., Петрова Т.С., Дедкова О.А., Игнатьев М.Г. Химическое формирование субмикронных элементов в GaAs // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий: Матер. III Всеросс. научной конф. – Томск, 2004. – С. 58.
14. Петрова Т.С., Гроо Е.П., Григорьева Л.В. Уменьшение индуктивности истокового вывода в ПТШ на GaAs и интегральных схемах на их основе // Научная сессия ТУСУР 2005: Матер. Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, 2005. – Т. 2. – С. 33–35.